مجلّهٔ جغرافیا و توسعهٔ ناحیه‌ای، سال شانزدهم، شمارهٔ ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۷، شمارهٔ پیاپی ۳۰

DOI: 10.22067/geography.v16i1.54905

پیش‌بینی نوسانات نمایه‌های حدی بارش در شهر مشهد با استفاده از ریزمقیاس نمایی مدل LARS-WG برای دو دورهٔ آتی ۲۰۳۰-۲۰۱۱ و ۲۰۶۵-۲۰۴۶

سید محمد عسکری‌زاده (دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران)
askarizadeh_1386@yahoo.com
غلامعلی مظفری (دانشیار آب و هواشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران، نویسندهٔ مسئول)
yazdmozafari@gmail.com
احمد مزیدی (دانشیار آب و هواشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران)
payamyazd@gmail.com

صص ۵۰ ـ ۲۵

چکیده

اهداف: تغییرات در رویدادهای حدی آب و هوایی و اقلیمی اثرات قابل توجهی دارد. به همین دلیل، به یکی از مهم‌ترین چالش‌های جدی فراروی جوامع در مقابله با تغییر اقلیم تبدیل شده است. یکی از جنبه‌های مهم تغییر اقلیم شناخت رفتار رویدادهای حدی است. از آن‌جایی که شهر مشهد تراکم جمعیت شهری دارد و به‌عنوان یک منطقهٔ نیمه‌صنعتی شناخته شده به طوری که اثرات پارامترهای اقلیمی بر بخش‌های مختلف جامعهٔ شهری و صنعتی آن حائز اهمیت است، نگرش به آینده یکی از ضروریت‌های مقولهٔ مدیریت کلان شهری و ناحیه‌ای در این شهر محسوب می‌شود.

روش: جهت ارائهٔ دورنمایی از تغییرات آتی رویدادهای حدی به‌ویژه بارش با استفاده از خروجی سه مدل گردش عمومی جو ($CNCM_3$, $HadCM_3$) NCCCSM,براساس سناریوهای A_1B, A_2 گزارش چهارم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم تحت مدل LARS-WG برای دو دورهٔ آتی ۲۰۳۰-۲۰۱۱ و ۲۰۶۵-۲۰۴۶ برای ایستگاه مشهد ریزمقیاس‌نمایی شده است. نمایه های بارش مطالعه‌شده در این

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۱۸ تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۰۴/۱۹

پـژوهش شـامل (PRCPTOT, R_{10}mm, R_{20}mm, R_{95}p, R_{99}p, RX_1day, RX_5day,SDII) برای دو دورهٔ آتی یادشده محاسبه شد.

یافته‌ها/ نتایج: نتایج نشان می‌دهد احتمالاً میانگین بیشینهٔ بارش پـنج‌روزه و شـدت بارش طی دورهٔ آتی ۲۰۳۰-۲۰۱۱ تحت سناریوی A_2 افزایش می‌یابد. سهم بیشـتری از کل بارش سالانه به وقوع بارش‌های سیل‌آسا و رگباری؛ یعنی بارش‌های بـیش از صدک ۹۵ و ۹۹ دورهٔ پایهٔ تعلق خواهد داشت.

نتیجه‌گیری: طبق نتایج، افزایش این نمایه‌ها به معنی افزایش فراوانی وقـوع سـیل و شدت آن به‌ویژه طی دورهٔ آتـی ۲۰۳۰-۲۰۱۱ خواهـد بـود. در حـالی کـه طـی دورهٔ ۲۰٦۵-۲۰٤٦ احتمـال کـاهش شـدت بـارش و نمایـه‌های بیشـینهٔ بـارش پـنج‌روزه پیش‌بینی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: نمایه‌های حدی، مدل‌گردش عمومی جـو- اقیـانوس، ریزمقیاس‌نمـایی، مشهد.

۱. مقدمه

امروزه پذیرفته شده است که بروز هر گونه تغییر در سیستم اقلیمی در مـدیریت منـابع آب و خاک اهمیت دارد. بنابراین، نوسانات اقلیمی اثرات جبران‌ناپذیری بر منابع آب و خاک ناحیهٔ خراسان رضوی به‌خصوص شهر مشهد داشته اسـت، بـه طـوری کـه ممکـن اسـت در نتیجـهٔ گرمایش زمین، تغییراتی در روند پارامترهای اقلیمی منطقه به وجـود آیـد و بـر اسـاس همـین مطالعات، وقـایع حـدی آب و هـوایی بسـیاری از فعالیت‌هـای انسـانی از جملـه کشـاورزی، باغداری، صنعت، جهانگردی و حمل و نقل را تحـت تـأثیر قـرار مـی‌دهـد کـه بسـتر بیشـتر رخدادها و وقایع مخرب آب و هوایی افزایش دما و بارش‌های حدی است. رویداد حـدی بـه رویدادهای نادری اطلاق می‌شود که از دیدگاه آماری احتمال وقوع آن رویداد خیلی کم اسـت و دربرگیرندهٔ معانی مختلفی اسـت. بـرای مثـال، می‌توانـد بـه صـورت مقـادیر بـین و بالـای صدک‌های (۹۵ و۵) (۹۰ و۱۰) و با مقادیر بالاتر از یک آستانه و با تداوم شرایطی ویژه تعریف شود (رحیم‌زاده، عسکری، فتاحی، محمدیان و تقی‌پور، ۱۳۸۸، ص. ۱۱۹). لازم به ذکـر اسـت

که رویدادهای حدی دیگری نیز وجود دارند که در یک مکان و در یک زمان خاص نادر است و نیاز به روش‌های تحلیل متفاوتی دارند.

گزارش‌های هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم[1] طی سالیان اخیر، بر افزایش فراوانی و شدت رویدادهای حدی آب و هوایی تحت شرایط تغییر اقلیم تأکید کرده است، به طوری که افزایش گازهای گل‌خانه‌ای و گرمایش زمین به شکل افزایش شدت، فراوانی و سهم رویدادهای حدی تجلی یافته است. در این راستا، مقایسه‌ای بین روند مشاهده شده و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل $Hadcm_3$[2] با تلفیقی از سه اجرای متفاوت در شرایط اولیۀ سطح زمین و جو انجام شد. مقایسۀ نتایج حاصل از مدل و روند رویدادهای حدی (تعداد روزهای یخبندان، تعداد روزهای خشک متوالی، نمایۀ سادۀ روزانۀ شدت بارش، تعداد روزهای با بارش بیش از ۱۰ میلی‌متر) نشان داد که لحاظ کردن اثرات انسانی در تلفیق مدل، به‌ویژه افزایش گازهای گل‌خانه‌ای به طور چشمگیری شبیه‌سازی تغییر رویدادهای حدی را بهبود می‌بخشد. طی سالیان اخیر بسیاری از مناطق جهان شاهد وقوع رخدادهای حدی بوده‌اند، مانند رخداد دمای بسیار پایین در زمستان ۲۰۱۰-۲۰۰۹ در قسمت‌های اعظم نیم‌کرۀ شمالی شامل اروپا، آسیا و آمریکای شمالی، وقوع مخرب‌ترین سیل پاکستان در تابستان ۲۰۱۰ (سازمان جهانی هواشناسی[3]،۲۰۱۱، ص. ۱۰۷۵). در چنین شرایطی، توسعۀ اقتصادی و شرایط زندگی پایدار در سال‌های آتی، بستگی به توانایی ما در مدیریت ریسک‌های مرتبط با رویدادهای حدی دارد (گزارش‌های هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم،۲۰۱۰، ص. ۷۳). بنابراین، هر نوع تلاشی برای پیش‌بینی وضعیت رویدادهای حدی به‌ویژه بارش در هر منطقه امری ضروری به نظر می‌رسد. در این راستا و جهت بررسی و تحلیل مقادیر (متوسط) حدی اقلیمی بارش و دما می‌توان از مجموعه نمایه‌های حدی که توسط شبکۀ پشتیبانی اقلیم اروپا (۲۷ نمایۀ حدی شامل ١٦ نمایۀ بارش و ۱۱ نمایۀ دما) معرفی شده، استفاده کرد. این نمایه‌ها در سال ۱۹۹۸ و توسط کمیسیون اقلیم‌شناسی سازمان جهانی هواشناسی[4]و برنامۀ تحقیقات اقلیم جهانی[5]وابسته

1. Intergovernmental Panel On Climate Change
2. Hadley center climate model
3. World meteorological organization(wmo)
4. Commission for Climatology(ccl)
5. World Climate Research Program(wcrp)

به طرح پیش‌بینی‌پذیری و تغییرپذیری اقلیم[1] متشکل از یک تیم کارشناسی در زمینهٔ آشکارسازی و پایش تغییر اقلیم و نمایه‌های آن‌ها[2] جهت بررسی و تعیین نمایه‌های حدی اقلیمی، تعیین و معرفی شدند (عساکره، ۱۳۸۹، ص. ۸۹).

تحقیقات نشان می‌دهد که دمای سطح زمین در بیشتر مناطق اروپا در طی قرن بیستم افزایش یافته است. از اوایل دههٔ ۹۰ میلادی بررسی تغییرات مقادیر حدی منطقه‌ای و جهانی به‌ویژه دما و بارش با نگرشی نو به آن در مناطق مختلف دنیا مانند آمریکا (داگانتو[3]، ۱۹۹٦) استرالیا، زلاند نو (پلومر[4]، ۱۹۹۹) چین (ژای[5]، ۱۹۹۹)، کانادا (بونسال[6]، ۲۰۰۱) آغاز شد. از مهم‌ترین نتایج این مطالعات کاهش تعداد روزهای یخبندان در عرض‌های بالا و میانی نیم‌کرهٔ شمالی و افزایش طول دورهٔ رویش در مقیاس جهانی به طور میانگین به مدت یک هفته در طول قرن بیستم است.

تاکنون پژوهش‌هایی دربارهٔ بررسی اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای جوی با تأکید بر وضعیت آتی رویدادهای حدی انجام شده است. به عنوان مثال،(زمنف[7]،۲۰۰۸، ص. ۲۰۳) زمنف در پژوهش خود تغییرات در بزرگی و الگوهای زمانی دو نمایهٔ حدی برای گندم شامل احتمال تنش‌های گرمایی طی زمان گل‌دهی و شدت تنش‌های خشکسالی را تحلیل کرد. جهت محاسبهٔ این نمایه‌ها، از یک مدل شبیه‌سازی گندم در ترکیب با سناریوهایی بر مبنای خروجی‌های مدل $Hadcm_3$ در ۱۸ ایستگاه اینگلند و والز (ریزگردانی‌شده با استفاده از مدل (LARS- WG) استفاده کرد. علی‌رغم دمای بالاتر و بارش تابستانی کمتری که برای دورهٔ ۲۰۵۰ پیش‌بینی شده بود؛ اما اثر تنش خشکسالی بر عملکرد گندم نسبت به دورهٔ حاضر کمتر پیش‌بینی شد؛ زیرا گندم جهت فرار از تنش خشکسالی تابستانی در زمان کوتاه‌تری می‌رسید؛ اما احتمال خسارات ناشی از تنش گرمایی در زمان گلدهی به طور چشمگیری طی این دوره افزایش نشان داد. در پژوهشی محققان نیز به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر وضعیت خشکسالی

1. Climate Variability and Predictability(clivar)
2. Expert team on climatic change detecion moitoring and indices(etccdmi)
3. Degaetaho
4. Plumer
5. Zhai
6. Bonsa
7. Semenov

حوضهٔ قره‌سو در دوره‌های آتی با استفاده از شاخص خشکسالی بـارش استانداردشـده[1] اقـدام کردند (گل‌محمدی و مساح، ۱۳۹۰، ص. ۳۲٦). در این پژوهش، خروجی‌هـای مـدل گـردش عمومی جـو Hadcm3 تحـت سـناریوی A2 در دورهٔ ۲۰٦۹-۲۰٤۰ میلـادی بـرای منطقـه بـا استفاده از SDSM[2] ریزمقیاس و با داده‌های مشاهداتی بارندگی منطقـه در دورهٔ پایـهٔ (۲۰۰۰-۱۹۷۱) مقایسه شد. نتایج نشان داد کـه حوضـه در دورهٔ ۲۰٦۹-۲۰٤۰ میلـادی شـاهد افـزایش بارش و به تبع آن کاهش شدت خشکسالی نسبت به دورهٔ پایهٔ خواهد بود.

ژانگ و ساو (۲۰۰۵)[3] به منظور بررسی روند شاخص‌های حدی دما و بارش با بهره‌گیـری از آزمون من‌کندال در دورهٔ آماری ۲۰۰۳- ۱۹۵۰ از داده‌های ۵۲ ایستگاه متعلـق بـه ۱۵ کشـور خاورمیانه از جمله ارمنستان، ایران، عراق، اسرائیل، سوریه و ترکیه استفاده کرده و نتایج نشـان داد که به لحاظ آماری به طور معنی‌داری روند مکانی همسانی در شـاخص هـای دمـا وجـود دارد که این روند مربوط به افزایش دما در این منـاطق بـوده و در شـاخص‌های بـارش شـامل تعداد روزهای دارای بارش متوسط، شدت بارش، حداکثر بارش روزانه روند خاصی مشـاهده نمی‌شود.

براتی وجهادی طرقی (۱۳۷۸) به منظور تعیین روند تغییرات دما و بارش شهر مشـهد، ایـن موارد را در دورهٔ آماری ۱۹۹٤-۱۹۵۱ با استفاده از تحلیل رگرسـیونی و هموارسـازی بررسـی کردند و نشان دادند که دما و بارش شهر مشهد روند افزایش دارد و این روند تا قبـل از ۱۹۷٤ با روند افزایش دما و بارش فصلی هماهنگی ندارد؛ اما از سال ۱۹۷٤ بـه بعـد رونـد فصـلی و سالانهٔ این دو عنصر با هم هم‌خوانی دارند.

عسکری و رحیم‌زاده (۱۳۸۵) به‌منظور مطالعهٔ تغییرپذیری بارش دهه‌هـای اخیـر ایـران، بـا استفاده از آزمون‌های من‌کندال و حداقل مربعات داده‌هـای ۳٤ ایسـتگاه سـینوپتیک کشـور در دورهٔ آماری ۱۹۹۷-۱۹۵۱ را بررسی کردند که نتایج هر دو روند، کـاهش و افـزایش در جمـع بارش سالیانه را نشان می‌دهد.

1. Standard precopitation index(SPI)
2. Statistical Downscaling model(SDSM)
3. Zang & Cao

بابائیان و نجفی‌نیک (۱۳۸٤) به ارزیابی تغییر اقلیم استان خراسان رضوی در دورهٔ ۲۰۱۰–۲۰۳۹ با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های گردش عمومی جو[1] پرداخته‌اند و بیان کردند خواص آماری داده‌های تولیدشده مشابهٔ دورهٔ آماری بوده؛ اما انحراف معیار آن‌ها به نسبت اختلاف داده‌های مدل‌های گردش عمومی جو در دورهٔ آینده و گذشته تغییر می‌کند.

پیش‌بینی تغییرات در رویدادهای حدی ناشی از گرمایش جهانی و تغییر اقلیم در ارزیابی اثرات بالقوهٔ تغییر اقلیم بر بخش‌های مختلف مانند: آب، کشاورزی و مدیریت سامانه‌های جمع‌آوری آب شهری بسیار مهم است. از آن‌جا که شهر مشهد تراکم جمعیت شهری زیادی دارد و به‌عنوان یک منطقهٔ نیمه‌صنعتی شناخته شده به‌طوری که اثرات پارامترهای اقلیمی بر بخش‌های مختلف جامعهٔ شهری و صنعتی آن حائز اهمیت است، نگرش به آینده یکی از ضروریات لازم در مقولهٔ مدیریت کلان شهری و ناحیه‌ای محسوب می‌شود. بنابراین، در این پژوهش به بررسی میزان تغییر مقادیر حدی بارش پیش‌بینی‌شده ایستگاه مشهد با استفاده از سه مدل گردش عمومی جو شامل ($CNCM_3$, $HadCM_3$,[2] NCCCSM[3]) طی دو دورهٔ زمانی ۲۰۱۱–۲۰۳۰ و ۲۰٤٦–۲۰٦٥ پرداخته شده است. انجام این پژوهش با هدف ارائهٔ چشم اندازی از وضعیت آتی مقدار بارش و تغییرات رویدادهای حدی آن انجام شده که این امر امکان برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و صحیح را در بخش‌های مختلف کشاورزی، منابع آب و برنامه‌ریزی‌های شهری مانند جمع‌آوری آب‌های سطح فراهم می‌آورد.

۲. داده‌ها و روش تحقیق

۲. ۱. داده‌ها

داده‌های استفاده‌شده در این پژوهش شامل داده‌های دیدبانی و شبیه‌سازی‌شده هستند. داده‌های دیدبانی شامل داده‌های دمای کمینه، بیشینه، بارش روزانه و ساعت آفتابی است که این داده‌ها مربوط به دورهٔ ۱۹٦۱–۲۰۱٤ میلادی ایستگاه مشهد (طول جغرافیایی ′۳۸ ^{0}۵۹، عرض جغرافیایی ′۱٦^{0}۳٦ ارتفاع ۹۹۹ متر بالاتر از سطح دریا) است. داده‌های شبیه‌سازی‌شده

1. General circulation model(GCM)
2. Center national de circulation model version
3. Ncar coupled community climate system model

توسط سه مدل گردش عمومی (HadCM3,CNCM3,NCCCSM) مربوط به دو دورهٔ ۲۰۳۰–۲۰۱۱، ۲۰۶۵–۲۰۴۶ است که تحت دو سناریو A2 و A1B و توسط مدل LARS-WG (دورهٔ آماری پایهٔ ۲۰۱۴–۱۹۶۱) در مقیاس ایستگاه ریزگردانی‌شده و در راستای کاهش عدم قطعیت میانگین نمایه‌های محاسبه‌شده برای سه مدل به دست آمده است (برای تمام مدل‌ها به طور یکسان و بدون وزن‌دهی عمل شد). در نهایت، مقدار درصد و میزان تغییر نمایه توسط رابطهٔ (۱) و(۲) محاسبه شد. نمایه‌های حدی بارش بررسی‌شده در این پژوهش در جدول (۱) آورده شده است(ویلبی، داوسون[۱]،۲۰۰۴، ص ۵۰)

رابطهٔ (۱)
$$\Delta 2020s = \frac{(V_{2020s} - V_{base}) * 100}{V_{base}}$$

رابطهٔ (۲)
$$V_{2020s} = (V_{2020} - V_{base})$$

Δ_{2020s}: درصد تغییر نمایه طی دورهٔ (به‌عنوان مثال۲۰۲۰) نسبت به دورهٔ پایه.

V_{2020s}: مقدار بارش (یا هر کدام از نمایه‌های بررسی‌شده) در دورهٔ مورد نظر (در اینجا ۲۰۲۰).

V_{base} : میزان بارش طی دورهٔ پایهٔ (۲۰۱۴–۱۹۶۱).

در ارزیابی رویدادهای حدی به رکوردهای اقلیمی طولانی‌مدت، با کیفیت بالا و قابل اعتماد با تفکیک زمانی روزانه (یا بالاتر) مورد نیاز است. بنابراین، در اولین قدم، کنترل کیفی و همگنی داده‌ها بررسی شد. در این تحقیق کنترل کیفی داده‌ها با بستهٔ نرم‌افزاری به نام RClimDex انجام شد که به‌عنوان یک ابزار استاندارد توسط ETCCDI[۲] معرفی شده است. همچنین، در زمان استفاده از داده‌های روزانهٔ بارش یک ایستگاه باید مطمئن بود که علاوه بر این‌که داده‌های ایستگاه از کیفیت بالایی برخوردارند، به طور غیرطبیعی ناهمگن نباشند. همگنی داده‌های استفاده‌شده نیز با بهره‌گیری از بستهٔ نرم‌افزاری RHtests_dlyPrcp تحت زبان برنامه‌نویسی R انجام شد.

1 .Wilby, Dawson
2. Exoer team on climate change detection and indices

جدول ۱- نمایه‌های حدی بارش مطالعه‌شده

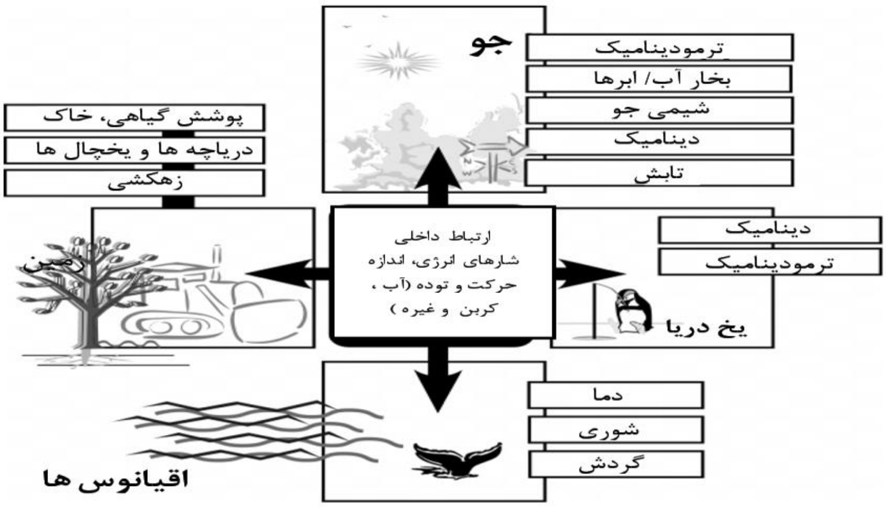
مأخذ: هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۱۰

ردیف	نماد	تعریف نمایهٔ بارش فرین	واحد
۱	PRCPTOT	اگر RR_{ij} میزان بارش در روز i ام در دورهٔ j و i نمایندهٔ تعداد روزهای در j باشد آنگاه $PRCPTOTi = \sum_{i=j}^{i} RRIJ$	میلی‌متر
۲	RX1 day	اگر RRij میزان بارش در روز i در دورهٔ j باشد، آنگاه حداکثر بارش روزانه برای دورهٔ j عبارتست از $RX1DAYi = MAX(RRIJ)$	میلی‌متر
۳	RX5 day	اگر RRij میزان بارش ماهانهٔ ۵ روزه در دورهٔ j باشد، آنگاه حداکثر بارش۵ روزه برای دورهٔ j عبارتست از $RX5DAYi = MAX(RRIJ)$	میلی‌متر
٤	SDII	اگر RRwj میزان بارش در یک روز بارانی (RR≥1mm) در دوره j و w عبارت باشد از روزهای تر در دوره j آنگاه $SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^{W} RR_{wj}}{W}$	میلی‌متر بر روز
۵	R10mm	اگر RRij میزان بارش روزانه در روز i در دورهٔ j باشد، آنگاه روزهای با بارش سنگین؛ یعنی تعداد روزهایی با مقدار بارش روزانه مساوی یا بیشتر از ۱۰ میلی‌متر عبارتست از تعداد روزهایی که RRij≥10mm	روز
٦	R20mm	اگر RRij میزان بارش روزانه در روز i در دورهٔ j باشد، آنگاه روزهای با بارش خیلی سنگین؛ یعنی تعداد روزهایی با مقدار بارش روزانه مساوی یا بیشتر از ۲۰ میلی‌متر عبارتست از تعداد روزهایی که RRij≥20mm	روز
۷	R95p	اگر RRwj میزان بارش روزانهٔ دورهٔ j در یک روز تر (RR≥1.0mm) و RRwn95 صدک ۹۵ ام بارش در روزهای تر دورهٔ ۱۹۹۰-۱۹٦۱ و w نمایندهٔ روزهای تر در دورهٔ باشد، آنگاه $R95_{pj} = \sum_{w=1}^{W} RR_{wj}$ که در آن $RR_{wj} > RR_{wn}95$	میلی‌متر
۸	R99p	اگر RRwj میزان بارش روزانه دورهٔ j در یک روز تر (RR≥1.0mm) و RRwn99 صدک ۹۹ ام بارش در روزهای تر دورهٔ ۱۹۹۰-۱۹٦۱ و w نمایندهٔ روزهای تر در دورهٔ باشد، آنگاه $R99_{pj} = \sum_{w=1}^{W} RR_{wj}$ که در آن $RR_{wj} > RR_{wn}99$	میلی‌متر

۲. ۲. مدل‌های استفاده‌شده

۲. ۲. ۱. مدل‌های جفت‌شدهٔ اقیانوس–اتمسفر [۱]

جهت بررسی تأثیر اقلیم بر سیستم‌های مختلف؛ مانند منابع آب در دوره‌های آتی و تولید سناریوهای مقادیر حدی بارش در ابتدا باید متغیرهای اقلیمی تحت تأثیر تغییرات گازهای گل‌خانه‌ای شبیه‌سازی شوند. روش‌های مختلفی برای شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آتی تحت تأثیر تغییر اقلیم وجود دارد که معتبرترین آن‌ها استفاده از مدل گردش عمومی‌جو است (مساح و آشفته، ۱۳۸٦، ص. ٤۰). تاکنون مدل‌های مختلفی در مراکز گوناگون تحقیقاتی طراحی شده‌اند که دارای مؤلفه‌هایی هستند که در شکل (۱) نشان داده شده‌اند؛ مانند مدل‌های Hadcm3، CSIRO[۲]، CGCM2[۳]. از آن‌جا که مهم‌ترین ورودی این مدل‌ها میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی است، سناریوهای مختلف انتشار که دربرگیرندهٔ چگونگی تغییرات این گازها در آینده است، ارائه شده‌اند (جدول ۲) (زمنف و استارتویچ[٤]، ۲۰۱۰، ص. ۳).



شکل ۱– ساختار یک مدل جفت‌شدهٔ جو– اقیانوس

مأخذ: مک‌گوفی کی، ۱۳۷۹

1. Atmospheric - ocean
2.Commonwelth scientific and industrial organization.
3.Coule gernal circulationmodel version
4. Semenov & strationvitch

۲. ۲. ۲. معرفی مدل LARS-WG

مدل LARS-WG یکی از مشهورترین مدل‌های تولید داده‌های هواشناسی است که برای تولید مقادیر روزانهٔ دماهای بیشینه و کمینهٔ بارش و تابش یا ساعت آفتابی در یک ایستگاه، تحت شرایط اقلیم حاضر و آینده به کار می‌رود. نسخهٔ اولیهٔ این مدل طی سال ۱۹۹۰ به‌عنوان بخشی از پروژهٔ ارزیابی ریسک‌های کشاورزی در بوداپست مجارستان ابداع شد. هستهٔ اصلی این مدل استفاده از زنجیرهٔ مارکوف است که به کرات از آن استفاده شده است (اشرف، موسوی بایگی، کمالی و داوری، ۱۳۹۰، ص. ۱۱۸٤)؛ (زمنف و بارو، ۱۹۹۷، ص. ۳۹۷). مدل LARS-WG از سه بخش اصلی واسنجی، ارزیابی و تولید یا شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی دهه‌های آینده تشکیل شده است. نیاز اساسی مدل در مرحلهٔ واسنجی، فایلی است که مشخص‌کنندهٔ رفتار اقلیم در دورهٔ گذشته است. این فایل با استفاده از داده‌های روزانهٔ پارامترهای اقلیمی ایستگاه هواشناسی مطالعه‌شده و اخذشده از مرکز اطلاعات و آمار سازمان هواشناسی کشور، با در نظر گرفتن یک دورهٔ ۵۳ ساله (۲۰۱٤–۱۹٦۱) به‌عنوان دورهٔ پایه تهیه شد و مدل بر اساس آن اجرا شد. پس از اطمینان از صحت نتایج ارزیابی و قابلیت مدل LARS-WG در شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی، مرحلهٔ سوم یا شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی برای دورهای آتی ۲۰۳۰–۲۰۱۱ و ۲۰٦۵–۲۰٤٦ اجرا شد.

نیاز اساسی برای اجرای این مدل، دو فایل با پسوند WG و Sce است. فایل اول همان داده‌های روزانهٔ ایستگاه‌های مطالعه‌شده در دورهٔ پایهٔ است و فایل دوم از خروجی ۳ مدل گردش عمومی جو ($Hadcm_3$, $CNCM_3$, NCCCSM) مطالعه‌شده در دورهٔ مشابه با دورهٔ پایهٔ به دست آمد. در حقیقت در این مرحله مدل با استفاده از رفتار اقلیم در دورهٔ پایه و ریزمقیاس‌نمایی آماری داده‌های مدل گردش عمومی جو، پارامترهای اقلیمی آینده را در حد مقیاس منطقهٔ مطالعه‌شده شبیه‌سازی می‌کند.

جدول ۲- مشخصات سناریوهای A1B و A2 انتشار (غلظت CO2 در سناریو دورهٔ پایه :334ppm)

مأخذ: هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم،۲۰۱۰

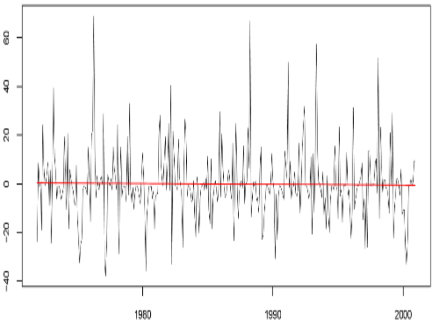
سناریو	فرض‌های کلیدی	غلظت CO_2 (ppm)	
		۲۰۳۰-۲۰۱۱	۲۰۶۵-۲۰٤٦
A1B (جهان غنی)	این سناریو با رشد اقتصادی بسیار سریع (۳٪ در سال)، رشد جمعیت پایین (۰/۲۷ در سال) و معرفی سریع فناوری‌های مؤثرتر و جدیدتر مشخص می‌شود. در مقیاس جهانی هم‌گرایی و ظرفیت‌سازی اقتصادی و فرهنگی وجود دارد.	٤۱۸	٥٤۱
A2 (جهان تفکیک شده)	هویت‌های فرهنگی مناطق مختلف را از هم تفکیک می‌کند که این امر جهان را ناهمگن‌تر می‌کند. رشد جمعیت بالا (۰/۸۳ درصد در سال) مورد تأیید است و تمرکز کمتر بر رشد اقتصادی (۱/٦٥ درصدی) و ثروت مادی وجود دارد.	٤۱٤	٥٤٥

۳. یافته‌های تحقیق

۳. ۱. کنترل کیفی و همگنی داده‌ها

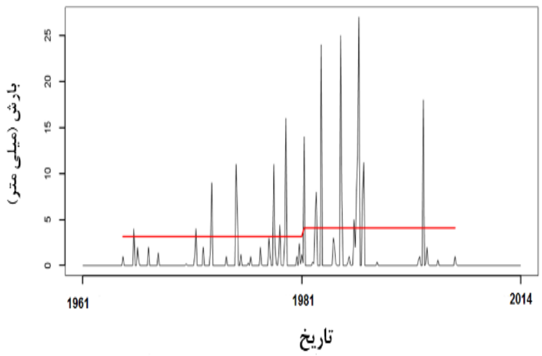
در زمان استفاده از داده‌های روزانهٔ دما و بارش یک ایستگاه یا یک حوضه باید مطمئن بود که علاوه بر این‌که داده‌های ایستگاه از کیفیت بالایی برخوردارند، به طور غیرطبیعی ناهمگن نباشند. برای بررسی همگنی داده‌های روزانهٔ بارش وRHtestsV3.r ازبستهٔ نرم‌افزاری RHtests_dlyPrcp می توان استفاده کرد. در این بسته نرم افزار جهت بررسی همگنی، داده‌های روزانه، ماهانه و سالانهٔ دما و بارش (به جز داده‌های روزانهٔ بارش) گنجانده شده است. این نرم‌افزار از یک مدل رگرسیون دومرحله‌ای برای کنترل نقاط تغییر چندگانه که ممکن است در یک سری زمانی وجود داشته باشد، استفاده می‌کنند.همچنین بررسی همگنی داده‌های یک ایستگاه را نیز می توان با استفاده از یک سری داده که همگن است (سری مرجع) انجام داد. یا می‌توان بدون داشتن یک سری مرجع اقدام به بررسی همگنی داده‌ها کرد. در این پژوهش با توجه به عدم دسترسی به یک سری مرجع، در بررسی همگنی داده‌ها از روش دوم استفاده شد.

داده‌های ایستگاه مشهد دارای کیفیت مطلوبی است. نتایج همگنی داده‌های بارش و دما نیز نشان داد که این ایستگاه در مقیاس روزانه دارای داده‌های همگن است (شکل‌های ۲ و ۳).



شکل ۲- سرهای ناهنجاری پایه همراه با برازش مدل رگرسیون چندگانهٔ داده‌های بارش ماهانهٔ مشهد ۲۰۱٤-۱۹٦۱

مأخذ: نگارندگان،۱۳۹٤



شکل ۳- نقطهٔ تغییر در سری داده‌های بارش روزانهٔ مشهد ۲۰۱٤-۱۹٦۱

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹٤

۳. ۲. بررسی توانمندی مدل‌های استفاده‌شده

جهت بررسی توانمندی سه مدل HadCM3، NCCCSM و CNCM3 در شبیه‌سازی داده‌های آب و هوایی به‌ویژه بارش از ضریب همبستگی بین داده‌های ماهانهٔ بارش مشاهده‌شده و داده‌های شبیه‌سازی سه مدل طی دورهٔ پایهٔ ۲۰۱٤-۱۹٦۱ استفاده شد (جدول ۳). لازم به ذکر است که با توجه به عدم قطعیت زیاد داده‌های بارش در مقیاس روزانه از داده‌های بارش مدل‌های گردش عمومی جو در مقیاس ماهانه استفاده می‌شود. با وجود پایین بودن مقدار ضریب همبستگی موجود بین داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در آزمون معنی‌داری این ضریب، مشخص شد که با اطمینان ۹۹ بین این دو سری داده رابطه وجود دارد. در جدول شمارهٔ (۳) مشخصات مدل‌های اقلیمی استفاده‌شده در این پژوهش ارائه شده است.

جدول ۳- مشخصات مدل‌های اقلیمی و ضریب همبستگی ماهانهٔ بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹٤

مدل جهانی اقلیم	کشور	تفکیک شبکه	سناریوهای انتشار	ضریب همبستگی
HadCM3	انگلستان	۲/۵*۳/۷۵º	SRA1B, SRA2, SRB1	۰/۵٦
NCCCSM3	آمریکا	۱/٤*۱/٤º	SRA1B, SRA2, SRB1	۰/٦۱
CNCM3	کانادا	۲/۸*۲/۸º	SRA1B	۰/٦۲

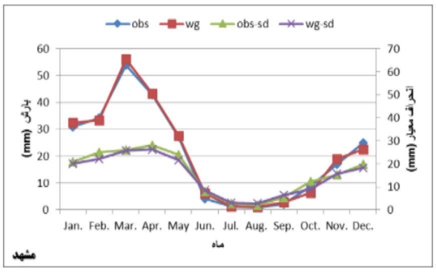
در بررسی توانمندی مدل LARS-WG در شبیه‌سازی داده‌های آب و هوایی می‌توان مقادیر میانگین، واریانس و انحراف معیار متغیرهای اقلیمی را با استفاده از آزمون t و F مقایسه کرد (زمنف، ۲۰۰۸، ص. ۲۰۳). در این رابطه، ابتدا با استفاده از ۵۳ سال دادهٔ دیدبانی‌شده در ایستگاه مشهد (۲۰۱٤-۱۹٦۱) پارامترهای اقلیمی بارش ایستگاه مشهد با استفاده از توزیع نیمه‌تجربی در مدل LARS-WG محاسبه شد. سپس مدل برای تولید ۸۰ سال داده بر اساس پارامترهای به‌دست آمده بر اساس سری داده‌های مشاهده‌شدهٔ ایستگاه اجرا شد. با تغییر عدد تصادفی این عمل چندین بار اجرا شد تا نتایج آماری قابل‌قبولی به‌دست آمد. نتایج حاصل از آزمون t برای این ایستگاه نشان داد که بین میانگین شبیه‌سازی شدهٔ بارش با مقدار واقعی آن اختلاف معنی‌داری در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ وجود ندارد. همچنین، ضرایب همبستگی، اریبی و میانگین خطای مطلق در سری ماهانهٔ داده‌های دیدبانی‌شده و شبیه‌سازی‌شده نیز برای این ایستگاه محاسبهٔ شد (جدول ٤). در ادامه مقایسه‌ای بین مقادیر میانگین، انحراف معیار و بیشینهٔ بارش ماهانه دو سری مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده انجام شد که در شکل‌های (٤، ۵ و ٦) ارائه شده است.

جدول ٤- مقایسهٔ مقادیر مدل‌سازی مدل LARS-WG با مقادیر واقعی در دورهٔ ۲۰۱٤-۱۹٦۱

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹٤

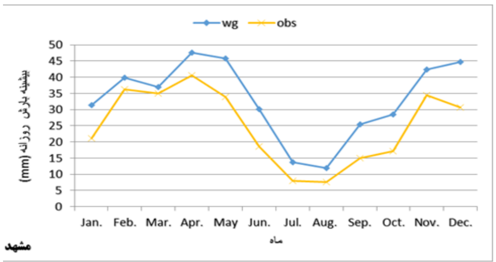
ایستگاه	BIAS	MAE	همبستگی
مشهد	۰/۳	۱/۲	۰/۹۹٦

با واسنجی مدل LARS-WG و اطمینان از قابلیت آن در شبیه‌سازی مطلوب سری داده‌ها برای ایستگاه مشهد، این مدل برای دو دورهٔ زمانی ۲۰۳۰-۲۰۱۱، ۲۰۶۵-۲۰۴۶ با استفاده از خروجی سه مدل گردش عمومی جو Hadcm3، NCCCSM و CNcm3 تحت سناریوی A_1B و A_2 (با تولید ۱۰۰ سال دادهٔ روزانهٔ بارش) اجرا شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار RClimDex نمایه‌های حدی محاسبه شد T در ادامه میانگین هر کدام از نمایه‌ها برای دورهٔ پایه و دو دورهٔ آتی به دست آمد.



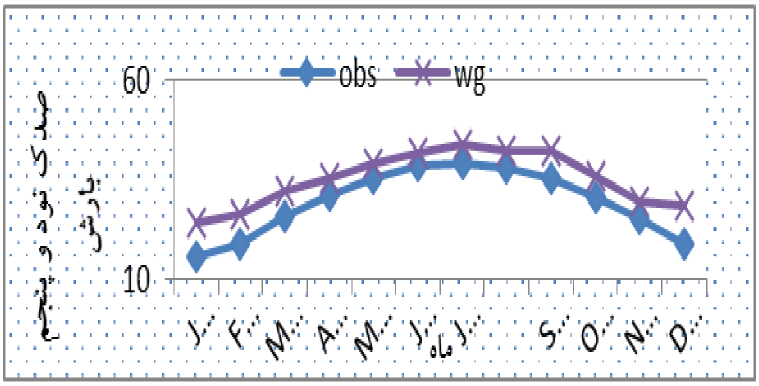
شکل ٤- مقایسهٔ میانگین و انحراف معیار بارش ماهانهٔ مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (۲۰۱٤-۱۹٦۱)

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹٤



شکل ٥- مقایسهٔ میانگین بیشینهٔ بارش ماهانهٔ مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (۲۰۱٤-۱۹٦۱)

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹٤



شکل ٦- مقایسهٔ صدک نود و پنجم بارش ماهانهٔ مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (۲۰۱٤-۱۹٦۱)

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹٤

٣. ٣. محاسبۀ نمایۀ حدی بارش

در جداول (٦،٥) نمایه‌های حدی بارش شهرستان مشهد با استفاده از خروجی مدل‌های گردش عمومی جو تحت دو سناریو انتشار A_2 و A_1B در دو دورۀ آتی ٢٠٣٠-٢٠١١ و ٢٠٦٥-٢٠٤٦ نسبت به دو دورۀ پایۀ ٢٠١٤-١٩٦١ ارائه شده است.

جدول ٥- نمایه‌های حدی بارش شهرستان مشهد با استفاده از خروجی مدل‌گردش عمومی جو تحت دو سناریوی انتشار A_2، A_1B طی دورۀ آماری ٢٠٣٠-٢٠١١

مأخذ: نگارندگان، ١٣٩٤

مشهد ٢٠٣٠-٢٠١١		PRCPTOT	R10mm	R20mm	R95p	R99p	RXlday	Rx5day	SDII
A1B	دورۀ پایۀ (WG)	٢٣٩/٤٨	٧/٢٤	١/٦٥	٥٠/١١	١٤/٤١	٢٩/١٧	٤١/٣٤	٦/٥٤
	CNCM3	٢٠٧/٥٦	٥/٨٢	١/١٦	٤٣/٥٥	١٢/٢٠	٢٤/٣٩	٣٤/٩٣	٥/٨١
	HadCM3	٢٤٨/٤٠	٧/٨٠	١/٦٠	٥٠/١٠	١٥/١٠	٢٩/١٠	٤٢/٤٠	٦/٦٠
	NCCCSM	٢٤٤/٩٤	٧/٠٦	١/٧٢	٥٢/٤٨	١٥/٦٨	٢٩/٨٥	٤٠/٦٤	٦/٤٩
A2	CNCM3	٢٥٥/٦٥	٧/٧٦	١/٩٠	٥٥/٧٦	١٧/٠٨	٣١/٨٣	٤٣/١٥	٦/٧٩
	HadCM3	٢٤٣/٨٢	٧/٥٠	١/٥٦	٤٩/٩٦	١٤/٩٦	٢٩/٣٦	٤٠/٩٥	٦/٥٧
	NCCCSM	٢٤٩/٣٤	٧/٥٨	١/٧٦	٥١/٧٩	١٥/٧٧	٢٩/٢٧	٤٠/٨٩	٦/٧١

جدول ٦- نمایه‌های حدی بارش شهرستان مشهد با استفاده از خروجی مدل گردش عمومی جو تحت دو سناریوی انتشار A_2، A_1B طی دورۀ آماری ٢٠٦٥-٢٠٤٦

مأخذ: نگارندگان، ١٣٩٤

مشهد ٢٠٦٥-٢٠٤٦		PRCPTOT	R10mm	R20mm	R95p	R99p	RXlday	Rx5day	SDII
A1B	پایۀ دوره (WG)	٢٣٩/٤٨	٧/٢٤	١/٦٥	٥٠/١١	١٤/٤١	٢٩/١٧	٤١/٣٤	٦/٥٤
	CNCM3	٢٥٠/٦٦	٧/٥٨	١/٦٨	٥٤/٠٠	١٦/٩٣	٣١/٢٩	٤١/٩١	٦/٦٥
	HadCM3	٢١٨/٥٥	٦/١٨	١/٢٢	٤٣/٨٧	١٣/١٢	٢٦/٦٧	٣٧/٣٦	٦/١٥

ادامه جدول ٦

مشهد ۲۰٦۵-۲۰٤٦		PRCPTOT	R10mm	R20mm	R95p	R99p	RXlday	Rx5day	SDII
	NCCCSM	۲۲۵/۹۳	٦/٤٦	۱/۲٦	٤۷/٤۸	۱٤/۰۰	۲۷/۵۸	۳۷/۵۳	٦/۱۵
A2	CNCM3	۲۲۸/۱۷	٦/۲۰	۱/٤۰	٤۷/۲۰	۱۳/۸۹	۲٦/٤۹	۳٦/۹۹	٦/۰۷
	HadCM3	۲٤۹/٦٦	۷/٦٦	۱/۸۸	۵۳/۳۹	۱۵۵۸	۲۷/۸۱	۳۸/۷۹	٦/٦۷
	NCCCSM	۲۳۲/۲۷	٦/۷۰	۱/٤٦	٤۸/۷٤	۱۳/۰۹	۲۷/۹٤	۳۸/۰٤	٦/۲۸

۳. ٤. محاسبهٔ درصد و میزان تغییرات نمایه‌های حدی بارش

در جداول (۷ و ۸) محاسبهٔ درصد و میزان تغییرات نمایه‌های حدی بارش شهرستان مشهد ارائه شده است.

جدول ۷- درصد و میزان تغییرات نمایه‌های حدی بارش مشهد با استفاده از مدل‌های خروجی گردش عمومی جو تحت سناریو A_1B و A_2 طی دورهٔ آماری ۲۰۳۰-۲۰۱۱

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹٤

مشهد ۲۰۳۰-۲۰۱۱		PRCPTOT	R10mm	R20mm	R95p	R99p	RXlday	Rx5day	SDII
	میانگین سناریوی A1B	۲۳۳/٦۳	٦/۸۹	۱/٤۹	٤۸/۷۱	۱٤/۳۳	۲۷/۷۸	۳۹/۳۲	٦/۳۰
	میانگین سناریوی A2	۲٤۹/٦۰	۷/٦۱	۱/۷٤	۵۲/۵۰	۱۵/۹٤	۳۰/۱۵	٤۱/٦٦	٦/٦۹
درصد تفاوت با دورهٔ پایه	CNCM3	-۱۳/۳۳	-۱۹/۵۹	-۲۹/۷۰	-۱۳/۰۹	-۱۵/۲۹	-۱٦/۳٦	-۱۵/۵۲	-۱۱/۲۲
	HadCM3	۳/۷۳	۷/۷۷	-۳/۰۳	-۰/۰۲	٤/۸۱	-۰/۲۳	۲/۵٦	۰/۹۲
	NCCCSM	۲/۲۸	-۲/٤۵	٤/۲٤	٤/۷۲	۸/۸۳	۲/۳۳	-۱/۷۰	-۰/۷۰
	CNCM3	٦/۷۵	۷/۲۲	۱۵/۱۵	۱۱/۲۷	۱۸/۵۲	۹/۱۲	٤/۳۷	۳/۸۵
	HadCM3	۱/۸۱	۳/٦۳	-۵/۳۰	-۰/۳۱	۳/۸٦	۰/٦٦	-۰/۹۵	۰/٤۰
	NCCCSM	٤/۱۲	٤/۷۳	٦/٦۷	۳/۳٤	۹/٤٤	۰/۳۷	-۱/۰۸	۲/٦۳

ادامه جدول ۷

مشهد ۲۰۳۰-۲۰۱۱		PRCPTOT	R10mm	R20mm	R95p	R99p	RXlday	Rx5day	SDII
	میانگین سناریوی A2	٤/۲۳	٥/۱۹	٥/٥۱	٤/۷۷	۱۰/٦۱	۳/۳۸	۰/۷۸	۲/۲۹
تفاوت مطلق	CNCM3	-۳۱/۹۲	-۱/٤۲	-۰/٤۹	-٦/٥٦	-۲/۲۰	-٤/۷۷	-٦/٤۱	-۰/۷۳
	HadCM3	۸/۹۲	۰/٥٦	-۰/۰٥	-۰/۰۱	۰/٦۹	-۰/۰۷	۱/۰٦	۰/۰٦
	NCCCSM	٥/٤۷	-۰/۱۸	۰/۰۷	۲/۳٦	۱/۲۷	۰/٦۸	-۰/۷۰	-۰/۰٥
	CNCM3	۱٦/۱۷	۰/٥۲	۰/۲٥	٥/٦٥	۲/٦۷	۲/٦٦	۱/۸۱	۰/۲٥
	HadCM3	٤/۳٤	۰/۲٦	-۰/۰۹	-۰/۱٦	۰/٥٦	۰/۱۹	-۰/۳۹	۰/۰۳
	NCCCSM	۹/۸٦	۰/۳٤	۰/۱۱	۱/٦۸	۱/۳٦	۰/۱۱	-۰/٤٥	۰/۱۷
	میانگین سناریوی A1B	-٥/۸٥	-۰/۳٤	-۰/۱٦	-۱/٤۰	-۰/۰۸	-۱/۳۹	-۲/۰۲	-۰/۲٤
	میانگین سناریوی A2	۱۰/۱۳	۰/۳۸	۰/۰۹	۲/۳۹	۱/٥۳	۰/۹۹	۰/۳۲	۰/۱٥

جدول ۸- درصد و میزان تغییرات نمایه‌های حدی بارش مشهد با استفاده از مدل‌های خروجی گردش عمومی جو تحت سناریو A1B و A2 طی دورهٔ آماری ۲۰٦٥-۲۰٤٦

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹٤

مشهد ۲۰٦٥-۲۰٤٦		PRCPTOT	R10mm	R20mm	R95p	R99p	RXlday	Rx5day	SDII
	میانگین سناریوی A1B	۲۳۱/۷۱	٦/۷٤	۱/۳۹	٤۸/٤٥	۱٤/٦۸	۲۸/٥۱	۳۸/۹۳	٦/۳۲
	میانگین سناریوی A2	۲۳٦/۷۰	٦/۸٥	۱/٥۸	٤۹/۷۸	۱٤/۱۹	۲۷/٤۲	۳۷/۹٤	٦/۳٤
	CNCM3	٤/٦۷	٤/۷۳	۱/۸۲	۷/۷٥	۱۷/٥٤	۷/۲۸	۱/۳٦	۱/۷۱
	HadCM3	-۸/۷٤	-۱٤/٦۱	-۲٦/۰٦	-۱۲/٤٥	-۸/۹۲	-۸/٥٥	-۹/٦۳	-٥/۹۳
	NCCCSM	-٥/٦٦	-۱۰/۷٤	-۲۳/٦٤	-٥/۲٥	-۲/۸٦	-٥/٤٤	-۹/۲۱	-٥/۹٦

ادامه جدول ۸

مشهد ۲۰۶۵-۲۰۴۶		PRCPTOT	R10mm	R20mm	R95p	R99p	RXlday	Rx5day	SDII
	CNCM3	-۴/۷۲	-۱۴/۳۴	-۱۵/۱۵	-۵/۸۲	-۳/۵۹	-۹/۱۷	-۱۰/۵۴	-۷/۲۲
	HadCM3	۴/۲۵	۵/۸۴	۱۳/۹۴	۶/۵۴	۸/۱۷	-۴/۶۴	-۶/۱۸	۱/۹۹
	NCCCSM	-۳/۰۱	-۷/۴۳	-۱۱/۵۲	-۲/۷۴	-۹/۱۳	-۴/۲۰	-۷/۹۹	^۱/۰۱
	میانگین سناریوی A1B	-۳/۲۴	-۶/۸۷	-۱۵/۹۶	-۳/۳۱	۱/۹۲	-۲/۲۴	-۵/۸۳	-۳/۳۹
	میانگین سناریوی A2	-۱/۱۶	-۵/۳۱	-۴/۲۴	-۰/۶۷	-۱/۵۲	-۶/۰۰	-۸/۲۴	-۳/۰۸
تفاوت مطلق	CNCM3	۱۱/۱۸	۰/۳۴	۰/۰۳	۳/۸۹	۲/۵۳	۲/۱۲	۰/۵۶	۰/۱۱
	HadCM3	-۲۰/۹۳	-۱/۰۶	-۰/۴۳	-۶/۲۴	-۱/۲۹	-۲/۴۹	-۳/۹۸	-۰/۳۹
	NCCCSM	-۱۳/۵۴	-۰/۷۸	-۰/۳۹	-۲/۶۳	-۰/۴۱	-۱/۵۹	-۳/۸۱	-۰/۳۹
	CNCM3	-۱۱/۳۱	-۱/۰۴	-۰/۲۵	-۲/۹۲	-۰/۵۲	-۲/۶۷	-۴/۳۶	-۰/۴۷
	HadCM3	۱۰/۱۸	۰/۴۲	۰/۲۳	۳/۲۸	۱/۱۸	-۱/۳۵	-۲/۵۶	۰/۱۳
	NCCCSM	-۷/۲۱	-۰/۵۴	-۰/۱۹	-۱/۳۷	-۱/۳۲	-۱/۲۲	-۳/۳۰	-۰/۲۶
	میانگین سناریوی A1B	-۷/۷۷	-۰/۵۰	-۰/۲۶	-۱/۶۶	۰/۲۸	-۰/۶۵	-۲/۴۱	-۰/۲۲
	میانگین سناریوی A2	-۲/۷۸	-۰/۳۸	-۰/۰۷	-۰/۳۴	-۰/۲۲	-۱/۷۵	-۳/۴۱	-۰/۲۰

٣. ٤. ١. مقدار سالانهٔ بارش در روزهای تر[1]

مطابق جدول (٧) طـی دورهٔ آتـی ٢٠٣٠-٢٠١١ درصـد تغییـرات ایـن نمایـه تحـت مـدل $CNCM_3$ و براساس سناریوی A_1B به میزان ١٣ درصد کاهش مـی‌یابـد و در بقیـهٔ مـدل‌هـا تحت هر دو سناریو این نمایه افزایش یافته است به‌طوری که میانگین این نمایه تحت سـناریو A_1B، ٥/٨ میلی‌متر کاهش یافته است؛ ولی تحت سناریوی A_2 به میزان ١٠/١ میلی‌متر نسـبت به دورهٔ پایهٔ افزایش دارد. طی دورهٔ آتـی ٢٠٦٥-٢٠٤٦ میـانگین درصـد تغییـرات ایـن نمایـه براساس سناریوی A_2 و $A_1\mathbf{B}$ به ترتیب ٣ و ١ درصد کاهش داشته است که میزان این کـاهش تحت سناریو A_1B، ٧/٨ و تحت سناریو A_2، ٢/٨ میلی‌متر نسبت به دورهٔ پایهٔ اسـت (جـدول ٨).

٣. ٤. ٢. روزهای با بارش سنگین [2]

همان‌طور که در جداول (٧، ٨) مشاهده می‌کنید به طـور میـانگین احتمـال مـی‌رود تعـداد روزهای با بارش سنگین طی دورهٔ ٢٠٣٠-٢٠١١ تحت سناریو A_1B، ٥ درصـد کـاهش؛ ولـی تحت سناریو A_2، ٥ درصد افزایش یابـد کـه از بـین سـه مـدل مطالعـه‌شـده مـدل $CNCM_3$ بیشترین درصد کاهش این نمایه؛ یعنی ٢٠ درصـد را داراسـت؛ البتـه میـانگین میـزان افـزایش تعداد این روزها قابل اغماض است، به‌طوری که تحت سناریو A_2 طی دورهٔ ٢٠٣٠-٢٠١١ بـه میزان ٠/٤ روز افزایش می‌یابد و پیش‌بینی می‌شود در طی دورهٔ ٢٠٦٥-٢٠٤٦ به طور میـانگین تعداد روزها با بارش بیش از١٠ میلی‌متر کاهش یابد که کاهش این نمایه تحـت سـناریو A_1B به میزان ٠/٤ و تحـت سـناریو A_2 بـه میـزان ٠/٥ روز اسـت و از بـین سـه مـدل $HadCM_3$ بیشترین درصد کاهش؛ یعنی ١٥ درصد نسبت به دورهٔ پایه را دارد.

٣. ٤. ٣. روزهای با بارش ابر سنگین [3]

این نمایه نشان‌دهندهٔ تعداد روزهای با بارش ابر سنگین است. پیش‌بینی می‌شود طـی دورهٔ ٢٠٣٠-٢٠١١ میانگین درصد تغییرات این نمایه در سه مـدل تحـت سـناریو A_1B، ١٠ درصـد کاهش و تحت سناریو A_2، ٦ درصد افزایش یابد که بیشـترین درصـد کـاهش تحـت سـناریو

1. Annual amount of precipitation in more days (PRCPTOT)
2. Namber of heavy precipitation days(R10mm)
3. Namber of very heavy precipitation days(R20mm)

A_1B مربوط به مدل $CNCM_3$ بـه میـزان ۳۰ درصـد اسـت (جـدول ۷)؛ ولـی در طـی دورهٔ ۲۰۶۵-۲۰٤٦ میانگین درصد تغییرات این نمایه تحت سناریو A_1B، ١٦ درصد و تحت سناریو A_2، ٤ درصد کاهش می‌یابد که بیشترین کـاهش مربـوط بـه سـناریو A_1B بـر اسـاس مـدل $Hadcm_3$ به میزان ٢٦ درصد است.

۳. ٤. ٤. سهم بارش کل سالانه به علت بارش‌های بیش از صدک ۹۹[1] و ۹۵[2] بارش دورهٔ پایه

این دو نسبت با محاسبهٔ میانگین مقدار بارش به علت روزهای بسیار تر و بیش از اندازه تر طی دورهٔ پایه و دو دورهٔ پیش‌بینی و تقسیم آن بر میانگین بارش طی دوره‌هـای یـاد شـده بـه دست می‌آید.

همان‌طور که در جداول (۷، ۸) مشاهده می‌شود، میانگین میزان تغییرات این نمایـه تحـت سناریوی A_1B و A_2 در هر دو دورهٔ کاهش یا افزایش ناچیزی داشـته؛ ولـی تحـت سـناریوی A_2 طی دورهٔ آتی۲۰۳۰-۲۰۱۱ میانگین نمایهٔ صدک ۹۹، ۱۱درصد و میانگین نمایهٔ صدک ۹۵، ۵ درصد افزایش را نسبت به دورهٔ پایهٔ نشان می‌دهد که قابل ملاحظه است. بنـابراین، میـانگین مقدار نمایه‌های صدک ۹۵ و صدک ۹۹ تحت سناریو A_2 در طی دورهٔ ۲۰۳۰-۲۰۱۱ به ترتیـب ۲/٤ و ۱/۵ میلی‌متر نسبت به دورهٔ پایهٔ افزایش دارد؛ ولـی احتمـال مـی‌رود کـه در طـی دورهٔ ۲۰٦۵-۲۰٤٦ شاهد کاهش این نمایه نسبت به دورهٔ پایهٔ باشیم، به‌طوری که میانگین این نمایـه در حدود یک میلی‌متر نسبت به دورهٔ پایهٔ کاهش می‌یابد.

۳. ٤. ۵. حداکثر بارش یک‌روزه[3]

همان‌طور که در جداول (۷ و ۸) مشاهده می‌شود، پیش‌بینی می‌شود میانگین میزان تغییرات این نمایه بر اساس سناریو A_1B نسبت به دورهٔ پایه تحت سـه مـدل مطالعـه‌شـده در دو دورهٔ ۲۰۳۰-۲۰۱۱ و ۲۰٦۵-۲۰٤٦ به ترتیـب ۱/٤ و ۰/۷ میلی‌متـر کـاهش و تحـت سـناریو A_2 در دورهٔ ۲۰۳۰-۲۰۱۱ ، ۱ میلی‌متر افـزایش و دورهٔ ۲۰٦۵-۲۰٤٦، ۱/۸ میلی‌متـر کـاهش یابـد کـه می‌توان نتیجه گرفت در حداکثر میزان بارش یک‌روزه تفاوت محسوسی مشاهده نمی‌شود.

1. Rain 99 percential
2. Rain 95 percential
3. Maximum one-day precipitation (Rx1day)

۳. ٤. ٦. حداکثر بارش پنج‌روزه[1]

با توجه به این‌که این نمایه بیانگر تداوم فعالیت سامانه‌های بارانزا و یا ناپایداری در دوره‌های چند روزه است. بنابراین، نمایه‌ای مناسب برای سیل محسوب می‌شود. نتایج به‌دست آمده در مقیاس سالانه نشان می‌دهد طی دورهٔ ۲۰۳۰–۲۰۱۱ میانگین سه مدل این نمایه تحت سناریوی A_1B کاهش یافته و تحت سناریوی A_2 شاهد افزایش آن می‌باشیم؛ ولی در دورهٔ ۲۰۶۵–۲۰٤٦ میانگین نمایه تحت هر دو سناریو کاهش را نشان می‌دهد (جداول ۷ و ۸).

۳. ٤. ۷. نمایهٔ سادهٔ شدت روزانه[2]

این نمایهٔ ساده شدت روزانهٔ بارش را نشان می‌دهد. این نسبت نشان‌دهندهٔ نسبت بارش کل سالانه به تعداد روزهای با بارش بیش از ۱ میلی‌متر است. نتایج حاصل از ریزگردانی سه مدل در ایستگاه مشهد نشان‌دهنده تغییرات بسیار نامحسوس این نمایه است؛ به‌طوری که میانگین تغییرات این نمایه در هر دو دورهٔ آتی حداکثر ۰/۲ میلی‌متر کاهش یا افزایش می‌یابد. در جدول ۹ و ۱۰ درصد تغییرات نمایه‌های بررسی‌شده نسبت به دورهٔ پایهٔ تحت سناریو A_1B و A_2 طی دوره‌های آتی ۲۰۳۰–۲۰۱۱ و ۲۰۶۵–۲۰٤٦ نشان داده شده است.

جدول ۹- درصد تغییرات نمایه‌های بررسی‌شده نسبت به دورهٔ پایهٔ تحت سناریوی A_1B

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹٤

نمایه	دورهٔ	مدل			
		Multi-Model	NCCCSM	HadCM3	CNCM3
PRC	۲۰۱۱–۲۰۳۰	-۲/٤	۲/۳	۳/۷	-۱۳/۳
	۲۰٤٦–۲۰٦٥	-۳/۲	-٥/۷	-۸/۷	-٤/۷
R10mm	۲۰۱۱–۲۰۳۰	-٤/۸	-۲/٥	۷/۸	-۱۹/٦
	۲۰٤٦–۲۰٦٥	-٦/۹	-۱۰/۷	-۱٤/٦	٤/۷
R20mm	۲۰۱۱–۲۰۳۰	-۹/٥	٤/۲	-۳	-۲۹/۷
	۲۰٤٦–۲۰٦٥	-۱٦	-۲۳/٦	-۲٦/۱	۱/۸
R95P	۲۰۱۱–۲۰۳۰	-۲/۸	٤/۷	۰	-۱۳/۱
	۲۰٤٦–۲۰٦٥	-۳/۳	-٥/۲	-۱۲/٤	۷/۸

1. Maximum five-day precipitation(Rx5day)
2. Simple daily inten sity index(SDII)

ادامه جدول ۹

نمایه	دورهٔ	مدل			
		Multi-Model	NCCCSM	HadCM3	CNCM3
R99P	٢٠١١–٢٠٣٠	٠/٦-	٨/٨	٤/٨	١٥/٣-
	٢٠٤٦–٢٠٦٥	١/٩	٢/٩-	٨/٩-	١٧/٥
Rx1day	٢٠١١–٢٠٣٠	٤/٨-	٢/٣	٠/٢-	١٦/٤-
	٢٠٤٦–٢٠٦٥	٢/٢-	٥/٤-	٨/٦-	٧/٣
Rx5day	٢٠١١–٢٠٣٠	٤/٩-	١/٧-	٢/٦	١٥/٥-
	٢٠٤٦–٢٠٦٥	٥/٨-	٩/٢-	٩/٦-	١/٤
SDII	٢٠١١–٢٠٣٠	٣/٧-	٠/٧-	٠/٩	١١/٢-
	٢٠٤٦–٢٠٦٥	٣/٤-	٦-	٥/٩-	١/٧

جدول ١٠- درصد تغییرات نمایه‌های بررسی‌شده نسبت به دورهٔ پایهٔ تحت سناریوی A_2

مأخذ: نگارندگان، ١٣٩٤

نمایه	دورهٔ	مدل			
		Multi-Model	NCCCSM	HadCM3	CNCM3
PRC	٢٠١١–٢٠٣٠	٤/٢	٤/١	١/٨	٦/٨
	٢٠٤٦–٢٠٦٥	١/٢-	٣٠-	٤/٣	٤/٧-
R10mm	٢٠١١–٢٠٣٠	٥/٢	٤/٧	٣/٦	٧/٢
	٢٠٤٦–٢٠٦٥	٥/٣-	٧/٤-	٥/٨	١٤/٣-
R20mm	٢٠١١–٢٠٣٠	٥/٥	٦/٧	٥/٣-	١٥/٢
	٢٠٤٦–٢٠٦٥	٤/٢-	١١/٥-	١٣/٩	١٥/٢-
R95P	٢٠١١–٢٠٣٠	٤/٨	٣/٣	٠/٣-	١١/٣
	٢٠٤٦–٢٠٦٥	٠/٧-	٢/٧-	٦/٥	٥/٨-
R99P	٢٠١١–٢٠٣٠	١٠/٦	٩/٤	٣/٩	١٨/٥
	٢٠٤٦–٢٠٦٥	١/٥-	٩/١-	٨/٢	٣/٦-
Rx1day	٢٠١١–٢٠٣٠	٣/٤	٠/٤	٠/٧	٩/١
	٢٠٤٦–٢٠٦٥	٦-	٤/٢-	٤/٦-	٩/٢-
Rx5day	٢٠١١–٢٠٣٠	٠/٨	١/١-	١-	٤/٤
	٢٠٤٦–٢٠٦٥	٨/٢-	٨-	٦/٢	١٠/٥-

ادامه جدول ۱۰

نمایه	دورهٔ	مدل			
		Multi-Model	NCCCSM	HadCM3	CNCM3
SDII	۲۰۱۱-۲۰۳۰	۲/۳	۲/۶	۰/۴	۳/۹
	۲۰۴۶-۲۰۶۵	-۳/۱	-۴	۲	-۷/۲

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به اثرانکارناپذیر تغییر اقلیم بر مقادیر حدی بارش، ارائهٔ سناریوهای این رویدادها جهت برنامه‌ریزی‌های دقیق‌تر برای بخش‌های مختلف اقتصادی- اجتماعی ضروری به نظر می‌رسد. شهرهای در حال توسعه‌ای؛ مانند مشهد به علت زیرساختارهای شهری پیچیده، مناطق حاشیه‌ای با ساختار غیر استاندارد شهری و تغییرات در الگوهای بارش به علت تغییر اقلیم، به طور روزافزونی در معرض خطر سیل قرار دارند.

در این پژوهش با هدف ارائهٔ دورنمایی از این رویدادها، تأثیر تغییرات میزان گازهای گل-خانه‌ای بر مبنای سناریوی A_1B و $\mathbf{A_2}$ بر نمایه‌های فوق به صورت درصد و مقدار تغییر آن‌ها نسبت به دورهٔ پایه بررسی شد (جداول ۹ و۱۰). نتایج نشان از کاهش میانگین اکثر نمایه‌ها طی دو دورهٔ تحت تأثیر سناریو A_1B است (جدول ۹) که این امر ممکن است به‌دلیل فرآیندهای برگشتی رطوبت و بارندگی باشد و تحت افزایش گازهای گل‌خانه‌ای انتظار می‌رود به‌دلیل افزایش دما و به تبع آن افزایش تبخیر، منطقهٔ مطالعه‌شده خشک‌تر شود؛ اما نکتهٔ قابل تأمل این است که درصد افزایش احتمالی بارش میانگین نمایهٔ صدک ۹۵ تحت سناریو A_1B طی دورهٔ ۲۰۶۵-۲۰۴۶ افزایش یافته که بیشترین افزایش این نمایه متعلق به مدل $CNCM_3$ به میزان ۱۸ درصد نسبت به دورهٔ پایهٔ است؛ ولی همان‌طور که در (جدول۱۰) مشاهده می‌کنید، نتایج نشان از افزایش تمام نمایه‌های مطالعه‌شدهٔ هر سه مدل تحت سناریوی A_2 در دورهٔ آتی ۲۰۳۰-۲۰۱۱ است؛ به‌طوری که میانگین بیشترین این افزایش متعلق به نمایهٔ صدک ۹۹ به میزان ۱۱ درصد نسبت به دورهٔ پایهٔ است. از آن‌جا که نمایه‌های صدک ۹۵ و ۹۹ معیارهای مناسبی برای بارندگی‌های حدی به شمار می‌روند. بنابراین، می‌توان چنین نتیجه گرفت که افزایش بارش‌های حدی در نتیجهٔ قدرت گازهای گل‌خانه‌ای (بر مبنای میزان فرض شده

مقدار این گازها در سناریوی A_2) رخ خواهد داد که این امر به‌ویژه در دورهٔ اول قابل ملاحظه است.

افزایش نمایه‌های روزهای با بارش سنگین و روزهای با بارش ابرسنگین تحت سناریوی A_2 در دوره ۲۰۳۰–۲۰۱۱ نیز قابل توجه است. به نحوی که به‌طور میانگین این دو نمایه تحت سناریو A_2 در حدود ۵ درصد نسبت به دورهٔ پایه افزایش می‌یابند با توجه به این‌که در اغلب اقلیم‌ها این دو نمایه ارتباط زیادی با جمع بارش فصلی و سالیانه دارند. بنابراین، با افزایش بارش در دورهٔ ۲۰۳۰–۲۰۱۱ تعداد روزهای خشک متوالی تا حدودی کاهش خواهد یافت و انتظار می‌رود طی این دوره شکل بارش‌ها از حالت ملایم به حالت رگباری تبدیل شود.

نمایهٔ سادهٔ شدت روزانه نیز تنها طی دورهٔ ۲۰۳۰–۲۰۱۱ تحت سناریوی A_2 افزایش خواهد یافت که این امر با پیش‌بینی‌های صورت‌گرفته مبنی بر افزایش شدت بارندگی در اغلب اقلیم‌ها بر اثر افزایش قدرت گازهای گل‌خانه‌ای مطابقت دارد.

بر اساس پیش‌بینی‌های انجام‌شده، به احتمال بسیار زیاد بارش در عرض‌های بالا افزایش می‌یابد. همچنین، به احتمال بسیار زیاد فراوانی موج‌های گرمایی، رویدادهای حدی گرمایی و بارش‌های حدی فزونی خواهند یافت. نتایج حاصل از این پژوهش نیز نشان‌دهندهٔ افزایش میزان کل بارش با دامنهٔ متفاوت بر حسب مدل استفاده‌شده طی دورهٔ آتی ۲۰۳۰–۲۰۱۱ است. همچنین، این نتایج با برخی از نتایج به دست آمده از سایر پژوهش‌ها (به عنوان مثال، انحراف معیار مثبت در شدت بارش در منطقهٔ شمال شرق ایران) هم‌خوانی دارد. همچنین، نتایج این پژوهش نشان داد که با افزایش نمایه‌های سیل؛ همچون صدک ۹۵ و صدک ۹۹ و حداکثر بارش ۵ روزه، در طی دورهٔ آتی۲۰۳۰–۲۰۱۱ برخی زیرساخت‌ها و مناطق شهری (به‌ویژه مناطق حاشیه‌ای شهر مشهد) در معرض خطر آسیب‌پذیری بالایی نسبت به این رخداد قرار خواهند گرفت. با توجه به اهمیت موضوع پیشنهاد می‌شود که مسئولین زمینهٔ انجام مطالعات بیشتری؛ همانند استفاده از روش‌های دیگر ریزمقیاس‌نمایی تحت سناریوهای جدید را در این عرصه فراهم کنند؛ چراکه لحاظ چنین نتایجی در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت در بخش خدمات شهری (در راستای مدیریت ریسک بلایای طبیعی) ضروری به نظر می‌رسد.

کتاب‌نامه

۱. اشرف، ب.، موسوی بایگی، م.، کمالی، غ. و داوری، ک. (۱۳۹۰). پیش‌بینی نیاز آبی چغندر قند در دورهٔ ۲۰۳۰ –۲۰۱۱ با استفاده از داده‌های اقلیمی شبیه‌سازی شده توسط مدل زیرمقیاس‌کنندهٔ LARS-WG (مطالعهٔ موردی: استان خراسان رضوی). *مجلهٔ آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، *۲۵* (۵) ، ۱۱۹٦–۱۱۸٤.

۲. بابائیان، ا. و نجفی نیک، ز. (۱۳۸٤). *ارزیابی تغییر اقلیم استان خراسان رضوی در دورهٔ ۲۰۳۹ – ۲۰۱۰ با استفاده از ریزمقیاس نمایی خروجی مدل GCM*. گزارش پروژهٔ پژوهش‌کدهٔ اقلیم‌شناسی و سازمان هواشناسی کشور.

۳. براتی، غ. و جهادی طرقی، م. (۱۳۷۸). تعیین روند تغییرات دما و بارش شهر مشهد طی دورهٔ آماری ۱۹۹٤– ۱۹۵۱. *فصل‌نامهٔ تحقیقات جغرافیایی*، ٥٥–٥٤صص١٦٥–۱۵۱

٤. رحیم‌زاده، ف.، عسکری، ا.، فتاحی، ا.، محمدیان، ن. و تقی‌پور، ا. (۱۳۸۸). روند نمایه‌های فرین اقلیمی دما در ایران طی دورهٔ ۲۰۰۳–۱۹۵۱. *فصل‌نامهٔ تحقیقات جغرافیایی*، ۲۲ (۲)، پیایی ۱۹۳، ۱٤٤–۱۱۹.

۵. عساکره، ح. (۱۳۸۹). تحلیل تغییرات بارش‌های فرین شهرزنجان. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، *۱* (۱ و۲)، ۱۰۰–۸۹.

٦. عسکری، ا. و رحیم‌زاده، ف. (۱۳۸۵). مطالعهٔ تغییرپذیری بارش دهه‌های اخیر ایران. *مجلهٔ پژوهشی پژوهش‌های جغرافیایی*، ۵۸، ۸۰–٦۷.

۷. گل محمدی، م. و مساح بوانی، ع. (۱۳۹۰). بررسی تغییرات شدت و دورهٔ بازگشت خشکسالی حوضهٔ قره‌سو در دوره‌های آتی تحت‌تأثیر تغییر اقلیم. *نشریهٔ آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)*، *۲۵* (۲)، ۳۲٦–۳۱۵.

۸. مساح، ع. و سادات آشفته، پ. (۱۳۸٦). بررسی اهمیت موضوع تغییر اقلیم در جهان و تأثیر آن بر سیستم‌های مختلف. *کارگاه فنی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب*، ۲٤ بهمن ماه ۱۳۸٦. (صص. ١٤–۱). تهران: کمیتهٔ ملی آبیاری و زهکشی.

9. Bonsal, B. R., Zhang, X., Vincent, L. A., & Hogg, W. D. (2001). Characteristics of daily and extreme temperature over Canada. *Journal of Climate*, *14*, 1959-19766

10. DeaGaetano, A. T. (1996). Recent trends in maximum and minimum temperature threshold exceedances in Northern United States. *Journal of Climate, 9*, 1646-1657.
11. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2010). *Meeting report: IPCC expert meeting on assessing and combining multi model climate projections.* Boulder, Colorado: National Center for Atmospheric Research.
12. Plummer, N., Salinger, M. J., Nicholls, N., Suppiah, R., Hennessy K.J., … Lough, J. M. (1999). Changes in climate extremes over the Australian region and New Zeland during the twentieth century. *Climate Change, 42*, 183-202.
13. Semenov, M. (2008). Simulation of extreme weather events by stochastic weather generator. *Climate Research, 35*, 203–212.
14. Semenov, M. A., & Barrow, E. M. (1997). Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change, 35*, 397-414.
15. Semenov, M. A., & Stratonovitch, P. (2010). Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climate Research, 4*, 1–14 .
16. World Meteorological Organization. (2011). *Weather extremes in a changing climate report: Hindsight on foresight*. Retrieved from https:// www. preventionweb. net/ publications/view/17033
17. Zhai, P. M., Sun, A., Ren, F., Liu, X., Gao, B., & Zhang, Q. (1999). Changes of climate extremes in China. *Climate Change, 42*, 203-218.